

没水平板を用いた浮棧橋の動揺軽減に関する研究

増田 光一*・高岩 千人**・八木 英紀***

1. 序 論

マリーナ内の係留用浮棧橋は一般の海洋構造物に比べ軽量であるため、波長の短い船舶航走波による同調振動が引き起こされる事がある。こうした状況は稼動時に発生する事が多く、利用者の転落や係留ボートの衝突、浮棧橋の破損等の事故の直接的原因となっている。マリーナ内の浮棧橋は、付近を航行する一般船舶の航走波のために、ねじれを伴った弾性振動を起こし、危険な状態になる場合が現実にある。しかし、このような問題のある浮棧橋は制約条件が多く、動揺を軽減させる方法が限られてしまう。また、そうした研究もほとんどなされていない。そこで、本研究では没水平板を用いた動揺軽減法を提案し、その効果を模型実験により確認した。更に、装置の流体力学的特性を把握するために強制動揺実験により没水平板の流体力を調査した。また、装置の特性と浮体の弾性問題を考慮した動揺計算法を開発し、その計算値と実験値を比較することによって計算法の妥当性を明らかにした。また、本数値計算法により系統計算を行い、適正な軽減装置の形状・配置を示した。

2. 動揺軽減装置の提案

浮棧橋の動揺を軽減させる手法としては、以下に示す項目が考えられる。

- 係留チェーンにより復元力、拘束力を増加させる。
- 位置保持のための鋼管杭の本数を増加させる。
- 浮体と杭の間にあるローラーにテンションを与え、拘束力を増加させる。
- 浮体重量を変化させることにより、浮体の固有周期をずらし、同調運動を回避する。
- カーテンなどの遮蔽物を浮体全面に取り付け、入射波高を減衰させる。
- 浮体に動揺減衰力を増加させるような装置を取り付ける。

浮棧橋の乾舷の維持、経済性、景観への配慮等を考え

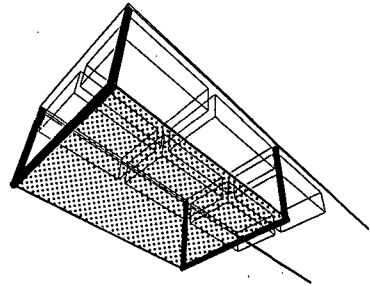


図-1 動揺軽減装置

た場合に、f)の動揺減衰効果を期待する方法が最も適していると考えた。

著者らが考案した軽減装置は図-1に示すように、浮棧橋の下部にフレームを介し平板を取り付けたものであり、船舶のキールの様に浮棧橋の上下ならびに回転運動に対して減衰効果を期待したものである。

3. 浮棧橋動揺実験

提案した動揺軽減装置の効果を確認するため、航走波により激しい動揺を起こしている浮棧橋をモデルに水槽実験を行った。本研究で対象とした浮棧橋は、ヒンジ等の可動連結部を持たない構造形式であり、設置場所は風波の影響のない水路に置かれている。水路を航行する一般船舶の航走波は直接この浮棧橋に到達する。航走波は船舶の大きさ、船速、浮棧橋との距離によって異なるが、浮棧橋と平行に船舶が航行した場合、入射角 $60^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 、波周期3.0s前後となる。

(1) 実験模型及び実験条件

模型の縮尺率は1/8とした。動揺は浮棧橋の剛性に大きく依存するため、相似則により実験模型の剛性を決定した。実験波の周期は0.6~1.5s(実機1.7~4.2s)入射波角度は浮棧橋の長手方向の軸に対して 60° 入射とした。

浮棧橋は護岸近傍に杭で係留されているため、実験模型も同様に壁の近傍に杭でHeave方向、Roll方向、Pitch方向の運動を許すように係留した。実験では、まず実際の浮棧橋の動揺を再現した。次に、軽減効率の良い没水平板の状態を知るため、材質、形状、配置について検討した。

* 正会員 工博 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科
 ** 工博 沼水建設(株) エンジニアリング本部
 *** 工修 (株)日本港湾コンサルタント 計画部

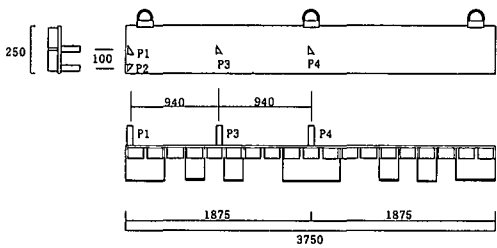


図-2 浮桟橋動揺実験模型 (単位:mm)

表-1 浮桟橋動揺実験ケース

ケース	実験状態	没水深比 (T/h)	面積比 (bl/BL)
I		—	—
II		0.56	0.13
III		0.56	0.38

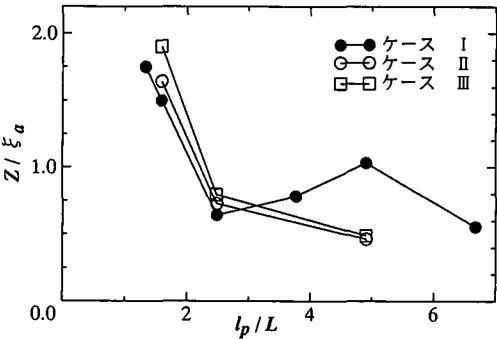


図-3 P1における運動応答値

(2) 計測及び解析

図-2に実験模型を示す。実験模型に取り付けた4つのポジションセンサにより、各点での上下方向の運動変位を計測した。これをフーリエ解析し、1次成分の振幅の値を実験値とした。

(3) 実験結果及び考察

実験状態は表-1に示すとおりである。(bl:没水平板の面積(m^2), BL:デッキ部の面積(m^2), T:没水平板の水深(m), h:設置水深(m))

動揺実験により得られた結果の一部を図-3に示す。浮桟橋上の各点の動揺量を比較した場合、中央付近に比べ端部が大きくなることが実験により把握されたため、ここでは端部(P1)の実験結果を示した。横軸は波長 L を桟橋全長 l_p で、縦軸は上下方向変位 Z を入射波振幅 ξ_a で無次元化した。

図中の●は浮桟橋の運動応答値で、○及び□は没水平板を取り付けた実験結果である。

横軸の $l_p/L > 3.0$ の短波長側で、没水平板による応答の

軽減が見られる。ここで没水平板の個数の違いによる応答値の変化は大きな相違が見られないことから、個数による動揺量軽減の変化は少ないことが分かった。しかし、没水平板の位置は重要な問題であり、動揺の大きな、浮桟橋の両端部に没水平板を取り付けない限り、全く軽減効果が見られないことが実験上確認されている。横軸の $l_p/L < 3.0$ の長波長側で、没水平板を取り付けたときの動揺がケースIの動揺量と同等あるいは上回る傾向にあるが、'実際の浮桟橋の動揺は高周波側で安全上問題となる'、'航走波の周期より長周期側となる'といった理由より、提案した没水平板による動揺軽減手法は実用上問題がないことがわかった。

実験により得られたその他の結果は以下の通りである。

- 1) 没水平板の材質は、剛性のある物よりも剛性のない膜状の物の方が、若干ではあるが軽減効果が高い。
- 2) 没水平板の深さは、没水深比(T/h)の大きい方が軽減効果が現れた。また、没水深比の大小により、軽減効果の周波数特性に相違が見られた。
- 3) 没水平板の粘性減衰効果の増加を期待して平板に開孔部を設けたが、その効果はほとんど見られなかった。
- 4) 軽減装置の重量による軽減効果はほぼ見られない。

4. 没水平板に働く流体力

前章の浮桟橋動揺実験により没水平板による動揺軽減効果を確認した。この没水平板の流体力学的特性を把握することにより効果的な軽減装置を開発できる。

没水平板の抗力係数や質量係数の研究は主に実験的に研究されている。Keulegan, Carpenter (1958)は振動流中に置かれた平板及び円柱に働く流体力を計測し、抗力係数と質量力係数が K_c 数に依存するという結果を示した。工藤ら(1980)は低 K_c 数での矩形柱に働く流体力を調査し、矩形の薄い平板は抗力係数が大きくなり、急激な運動に対する抵抗という点で有利な形状であるという結果を示した。

しかしながら、没水平板の形状、水底の影響、自由表面の影響を考慮した流体力については明確に示されていない。そこで、没水平板の上下方向の流体力を強制動揺実験により調査した。

(1) 実験模型及び実験条件

模型の縮尺は1/8で前章の実験と一致させた。実験模型は長さ0.30(m)、幅0.20(m)、厚さ0.006(m)の平板で剛性の高いアクリル製である。強制動揺の周期は0.6~1.9sで振幅 a は粘性減衰力を調査するため $a/b =$

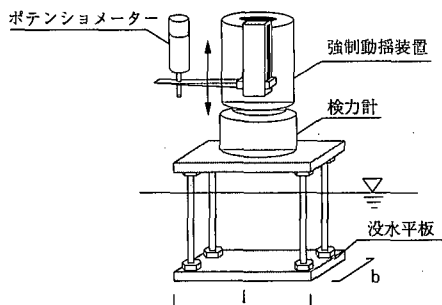


図-4 強制動揺実験状態

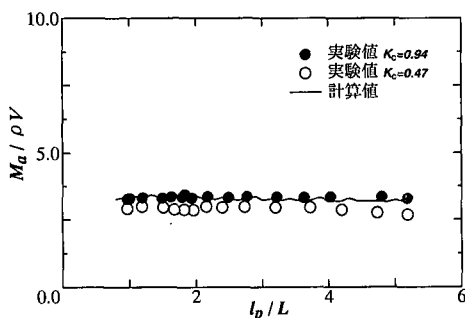


図-5 没水平板の上下方向付加質量係数

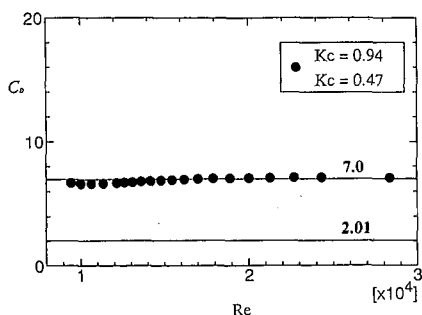


図-6 没水平板の抗力係数

0.074~0.60 (b : 没水平板の幅) で変化させた。実験状態を図-4 に示す。

(2) 計測及び解析

強制動揺の変位と没水平板に働く力を計測し、フーリエ解析することにより付加質量、減衰力を求めた。強制動揺実験で得られる減衰力は、抗力係数と造波減衰力を含んでいるが、それぞれを分離することは困難である。これらを分離するため、異なる振幅で実験を行い、得られた減衰力を連立させることにより抗力係数を決定した。ここで、造波減衰力は線形理論を仮定し、変化しないものとしている。

(3) 実験結果及び考察

実験により得られた付加質量係数と抗力係数を示す。

図-5 は横軸を波長 L を桟橋全長 l_p で、縦軸は付加質量係数 M_a を ρV (ρ : 流体密度, V : 浮桟橋のフロート1つの質量 $= 7.371 \times 10^{-4} \text{ (m}^3\text{)}$) で無次元化している。図中の●, ○は実験値を実線は2次元ハイブリッド型有限要素法による計算値を表している。実験値と計算値は一致しており、没水平板の上下方向に働く付加質量の推定が有限要素法により可能であることが解った。

図-6 の横軸はレイノルズ数、縦軸は抗力係数を表している。図よりレイノルズ数による抗力係数の変化がなく $C_d = 7.0$ と考えられる。この値は一般に示されている平板の $C_d = 2.01$ よりもかなり大きな値を示しているが、薄い平板の場合、渦の剥離が起こりやすいために低 K_c 数でも抗力係数が大きくなるものと推測される。

5. 浮桟橋の動揺評価法

浮桟橋は構造的に長手方向に変形するため、浮桟橋の運動は弾性振動を伴ったものと考えらる。そこで浮桟橋の動揺を正確に評価するために弾性振動を考慮した動揺計算法を開発した。開発した計算法は、増田ら (1985) の示した計算法と同様に、構造体に両端自由のオイラー・ベルヌーイ梁と仮定し、固有関数展開によるモード解析で、任意の点における上下方向の運動変位量を求める手法である。また、没水平板が浮桟橋に取り付けられたときの動揺を粘性減衰影響を含めて評価できるようにした。

本章では、開発した動揺計算法の整合性を確認するため、3章で用いた模型で再実験を行い、比較考察する。

(1) 運動-振動応答解析

a) 基本仮定

以下を計算上の基本仮定とした。

1) 流体は非粘性、非圧縮性の理想流体であり、その運動は非回転である。しかし、没水平板については粘性減衰力を考慮した。2) 自由表面の境界条件は微小振幅波を仮定する。3) 構造体をせん断変形と回転慣性の影響を無視した両端自由のオイラー・ベルヌーイ梁とみなす。4) 構造物の運動及び振動は線形理論の範囲であるとする。5) 構造体、入射波は縦波で周期運動するものとし、定常状態を論ずる。

b) 運動-振動方程式

単位長さ当りの Radiation 流体力を $F_R(x, t)$ 、波浪強制力 $F_E(x, t)$ 、内部粘性減衰力を $F_C(x, t)$ とし、没水平板の粘性減衰力を F_{Cv} としたときの強制振動方程式は次式で示される。

$$EI \frac{\partial^4 v(x, t)}{\partial x^4} + \rho g B(x) v(x, t) + m \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} + F_C(x, t) + F_R(x, t) + F_{Cv}(x, t) = F_E(x, t) \quad \cdots (1)$$

但し、 E : ヤング係数, I : 断面二次モーメント, m :

単位長さ当りの質量, $\nu(x, t)$; 変位である。今, 変位 $\nu(x, t)$ は基準座標系 $P_r(t)$ とモード型 ϕ_r を用いることにより, 次式のように定義できる。

$$\nu(x, t) = \sum_{r=1}^{\infty} P_r(t) \phi_r(x) \quad \cdots \cdots (2)$$

(2)式を用いて, 粘性減衰力を表すと次のようになる。

$$F_{cv}(x, t) = \sum_{r=1}^{\infty} \bar{N}_r \dot{P}_r(t) \phi_r(x) \quad \cdots \cdots (3)$$

$$\begin{aligned} \bar{N}_r &= \frac{1}{2} \rho S C_d |\dot{\nu}(x, t)| \\ &= \frac{8}{3\pi} \cdot \frac{1}{2} \rho S C_d \omega |\nu(x, t)| \quad \cdots \cdots (4) \end{aligned}$$

但し, $\bar{N}_r$ は, 単位長さ当たりの上下揺の粘性減衰力である。(4)式中の ρ は流体密度, S は投影面積, C_d は抗力係数である。粘性流体力は, 没水平板を付加したときのみ考慮し, 非線形項を等価線形化し, 繰返し計算により求めた。

c) 流体力及び強制力

没水平板は板厚 $D=0$ の薄い平板であるため 3 次元の境界要素法等により流体力, 強制力を解くことが困難である。そこで本論では 2 次元ハイブリッド型有限要素法により断面の流体力を求め, 流体力, 強制力を Strip 法により算定した。

(2) 模型実験

a) 実験条件

実験波は規則波で周期 0.7~1.9 s (実機 2.0~5.3 s), 入射波角度は実験模型の長手方向の軸に対して 0° , 水深は 0.5 m (実機 4.0 m) で行った。係留は上下以外の運動を拘束できる 2 点ローラ方式のガイド機構により行った。浮桟橋には図-7 に示すようにポジションセンサを浮桟橋の端部と中央部にそれぞれ 3 箇所ずつ 9 箇所設置した。

(3) 計算結果と実験結果との比較

図-8 に結果の一部を示す。この結果は図-7 の P2, P5, P8 の上下運動の周波数応答値を示している。横軸は桟橋全長 l_b を波長 L で, 縦軸は各点における変位量 Z を入射波振幅 ξ_a で, 無次元化した。図中の●と実線は没水平板無しの実験値と計算値, 図中の○と点線は表-1 に示しているケース II の実験状態での実験値と計算値を表している。

実験値, 計算値共に, 浮桟橋の動揺応答値は 3 章の結果と同様に浮桟橋の中央部より端部の値の方が大きい。

次に, 実験値と計算値の比較をする。ケース I の実験値と計算値は各地点の各波長で全体的に良い一致を示している。しかし P2 における $l_b/L < 2.0$ の長波長側で実験値が大きな値を示すことがあるが, これは入射波側では端部の浮体形状が箱形であるため Whipping の影響が強

いためだと思われる。

ケース II の実験値, 計算値について考察すると全体的に実験値が上回っているが, 航走波の周期 $l_b/L > 2.0$ で, 粘性減衰力を考慮した計算値と実験値は良い相関を示しており, 没水平板の効果を良く説明している。以上の結

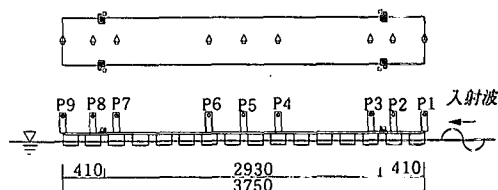


図-7 実験模型 (単位: mm)

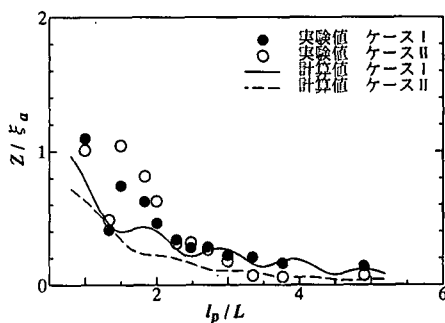


図-8(a) 実験結果と計算結果 (P2)

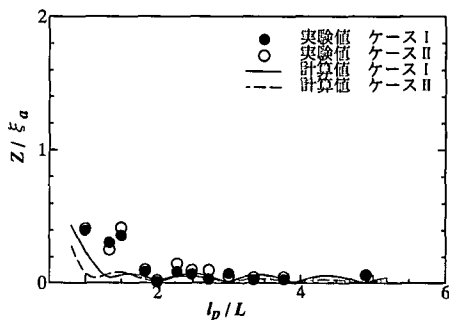


図-8(b) 実験結果と計算結果 (P5)

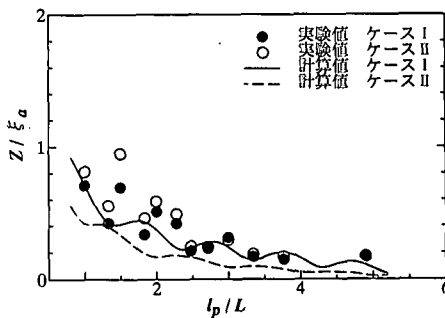


図-8(c) 実験結果と計算結果 (P8)

果から、本論で示した計算手法により没水平板の効果を含めた浮棧橋の波浪中弾性動揺を求めることが可能である事が分かった。

さらに、軽減装置による動揺軽減効果を見る。ケース I とケース II の実験値を比べると、浮棧橋動揺実験と同様に $l_p/L < 2.0$ の長波長側でケース II の実験結果がケース I の結果を上回る傾向がある。また、動揺の大きな P2 では動揺軽減装置の効果は見られたが、動揺の小さな P5, P8 では大きな効果は見られなかった。

6. 動揺軽減装置の軽減効率特性

本章では、前章で示した理論計算手法を基に本装置の適正な状態を系統計算により調べた。

(1) 計算条件

計算を行うモデルは図-7 に示した弾性応答解析に用いたモデルと同じものを用い、P2 における応答の軽減率を計算した。波の周期は 0.93 s (実機 2.64 s) とし、調査する没水平板のパラメータは、没水深、幅、長さとする。

平板の厚さ、形状は工藤ら (1980) により、矩形の薄い平板が急激な運動に対する抵抗という点で有利な形状であるという結果が示されている。そのため、没水平板の厚さ、形状の変化は考えず、薄く、矩形の平板を計算対象とした。取り付けける位置は、動揺の大きな両端部に取り付けけた状態で計算を行った。

(2) 計算結果

図-9, 図-10 に結果の一部を示す。図-9 の横軸は没水深と水深の比、図-10 は没水平板の長さ l と浮棧橋の幅 B との比、縦軸は共に没水平板を取り付けたときの応答値 Z を没水平板を付けていないときの応答値 Z_f で割った軽減率を示している。

図-9 は没水平板の長さ l を $l/B=1.6$ で固定し、幅と没水深による変化を示している。この結果から幅は広く、没水深の深いものが軽減効果の高くなることがわかる。以上の考察から図-10 は浮棧橋の制約条件から、没水平板の最大幅である浮棧橋の幅 B と没水平板の幅 b との比が $b/B=0.8$ 、並びに没水平板の没水深 T と設置水深 h との比 $T/h=0.9$ の計算を行った。

図-10 の結果から $l/B=1.0 \sim 2.0$ の長さの没水平板があれば有効な軽減効果を持つことが分かる。また、 $l/B > 2.0$ となると更に応答値が軽減されるが、没水平板に働く応力や経済性を考慮すると $l/B=2.0$ 以上は必要ないと思われる。

7. 結 言

本論で示された結果を以下に示す。

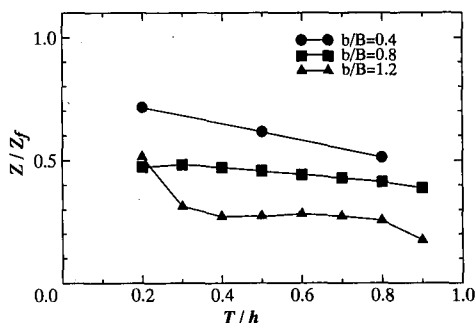


図-9 没水深による軽減効果の変化

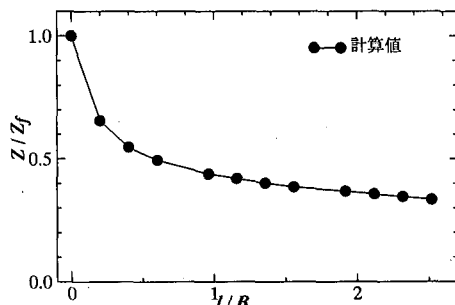


図-10 没水平板の長さの変化による軽減効果の変化

1) 航走波に対応する短周期の波において、没水平板による動揺軽減が模型実験により確認された。(実証実験においても動揺軽減効果が認められ、実機に適用された場合も良好な効果が確認されている。)

2) 没水平板の流体力を強制動揺実験により把握することができた。また薄い平板の抗力係数は一般に示されている値より大きく約 7.0 の値を示した。

3) 弾性問題を考慮した動揺解析により浮棧橋の周波数応答が得られた。また、没水平板による粘性減衰力を含めた計算は実験値と良い相関を示した。

4) ここで示された理論計算により、浮棧橋の下部に取り付ける没水平板の位置及び大きさの変化による特性が把握された。没水平板の最適な没水深はできる限り深く、幅はできる限り広く、長さは浮棧橋の幅に対して 2 倍の長さがあると効率の良い軽減効果が見れる。

参 考 文 献

- 工藤君明, 木下 篤, 仲渡道夫 (1980): 振動する矩形柱に働く流体力に関する実験的研究, 関西造船協会誌, 177 号
 増田光一, 前田久明, 加藤 渉, 臼井幹人 (1985): 波浪中の大型バージ浮遊構造物の弾性応答挙動に関する研究, 日本造船学会論文集, 第 158 号
 G. H. Keulegan & L. H. Carpenter (1958): Forces on cylinders and plates in an oscillating fluid, J. Res. Bur. Standard, L, X, No. 5